

2/27/04

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 103 11 410.6  
**Anmeldetag:** 13. März 2003  
**Anmelder/Inhaber:** Sennheiser electronic GmbH & Co KG,  
30900 Wedemark/DE  
**Bezeichnung:** Ultraschallwandler mit hohem Wirkungsgrad  
**IPC:** B 06 B 1/02

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 25. März 2004  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Eck", is placed here.

**CERTIFIED COPY OF  
PRIORITY DOCUMENT**

# Ultraschallwandler mit hohem Wirkungsgrad

## Stand der Technik

PT/Go/22.10.02

Die Coulombkräfte zwischen Gegenelektrode und Membran, die letztere in die Bewegung bringen, sind sehr schwach und vermindern sich mit dem Quadrat des Luftspaltes. Aus diesem Grund muß der Luftspalt möglichst klein sein. Hohe Schalldrücke erreicht man außerdem nur bei ausreichend großer schwingender Fläche der Membran. Diese zwei Forderungen widersprechen einander, da eine großflächige Membran von der Gegenelektrode angezogen werden kann und dabei die Fähigkeit zum Schwingen (und folglich zum Strahlen) verliert. Bei den bekannten elektrostatischen Ultraschallwandlern löst man das Problem mit Hilfe von unterstützenden Elementen an der inneren Oberfläche der Gegenelektrode. Als solche können Stege oder Säulen dienen [1-3]. Verbreitet sind auch Ultraschallwandler, bei denen die Membran direkt auf der aufgerauhten Oberfläche der Gegenelektrode liegt [3, 4]. In allen diesen Fällen ist die Membran in viele kleine strahlende Zonen unterteilt. Durch die erhöhte mechanische Stabilität arbeiten solche Wandler mit wesentlich höheren Polarisation- und Signalspannungen. Entsprechend hoch ist dann auch der erreichbare Schalldruck.

Bei der Konstruktion der Ultraschallwandler verfolgt man also zwei Ziele:

- minimale mögliche Verluste an schwingungsfähiger Membranfläche bedingt durch die Unterstützungsstruktur und
- möglichst ganzflächige und effektive Anregung der Membran.

Der in [4] beschriebene Multi-Support-Wandler entspricht weitgehend diesen Forderungen. Die Membran stützt sich dabei auf kleine isolierende Scheibchen, die gleichmäßig auf der perforierten Gegenelektrode verteilt sind. Die Höhe der Scheibchen bestimmt dabei den Luftspalt zwischen Gegenelektrode und Membran.

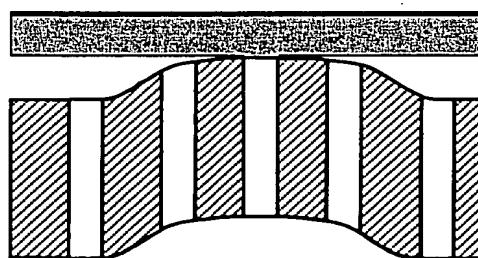
## Optimierte Lösung

Durch die optimale und präzise Prägung der Gegenelektrode kann man Multi-Support-Wandler nicht nur wesentlich vereinfachen (die Notwendigkeit der Distanzscheibchen entfällt), sondern auch seinen Wirkungsgrad wesentlich erhöhen. Die stark vereinfachte Konstruktion eines solchen Wandlers ist in der Abb. 1 dargestellt. Aus der Abbildung ist ersichtlich, daß die Erhebungen relativ große Flächen haben. Da die Membran im Idealfall nur auf den höchsten Punkten der Erhebungen liegt, sind die Verluste an schwingungsfähiger Membranfläche identisch mit denen beim Multi-Support-Wandler. Was aber die Anregungskräfte betrifft, hat die Variante mit der geprägten Gegenelektrode wesentliche Vorteile, da der Luftspalt zwischen Membran und Gegenelektrode im Bereich der Erhebungen kleiner als die Höhe der Erhebungen ist. Die Anregungskräfte in diesen Bereichen sind offensichtlich wesentlich höher, als in den Bereichen zwischen den Erhebungen und dadurch steigt der Wandlerwirkungsgrad. Die Abb. 2, wo ein Element der Gegenelektrode stark in der Z-Achse vergrößert gezeigt ist, veranschaulicht das. Aus oben genannten Gründen muß die optimale Geometrie der Gegenelektrode so gestaltet, wie es in der Abb. 3a und 3b dargestellt ist. Auf die ganze Fläche der Membran wirken dabei größere Kräfte als bei bekannten Ultraschallwandlern. In den Bereichen zwischen Erhebungen, wo die Membranauslenkung am größten ist, bleibt der Abstand zwischen Membran und Gegenelektrode ausreichend um das

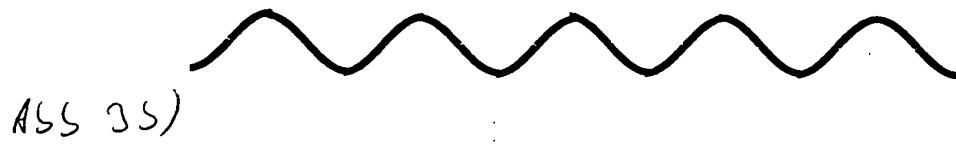
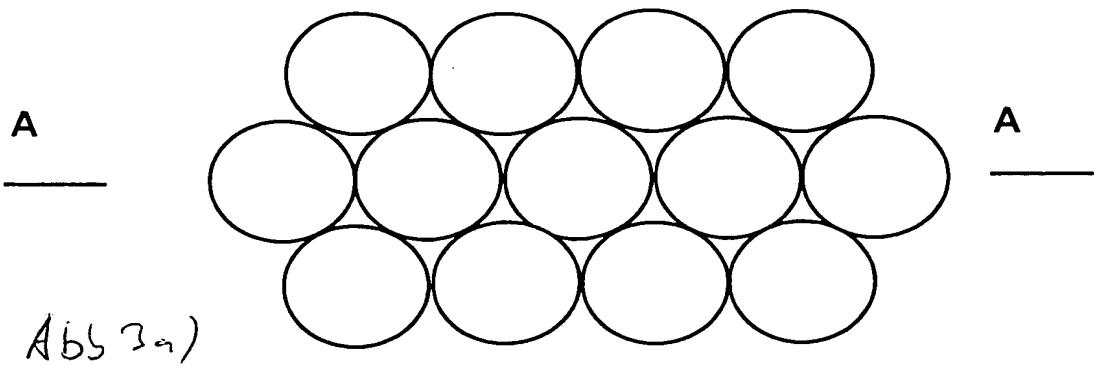
Anklatschen der Membran zu vermeiden. Abb. 3b zeigt, daß der Querschnitt der Gegenelektrode bildet sinusförmige Kurve.  
Die Erhebungen müssen oben unbedingt abgerundet sein, da die spitze Form führt zu elektrischen Durchschlägen der Membran.  
Die Prägung der Gegenelektrode kann selbstverständlich auch trapezförmig sein, was bei den Wandler für den Frequenzbereich 30-50 kHz vorteilhaft ist.



**Abb. 1**



**Abb.2**



Oben ist als Beispiel die hexagonale (dichteste) Verteilung von geprägten Erhebungen gezeigt. Unten ist der Querschnitt A-A mit unserer sinus-förmigen Geometrie der unterstützende Multi-Point - Struktur

# Hocheffektive breitbandige Ultraschallwandler

Vladimir Gorelik

Sennheiser electronic GmbH & Co. KG; Email: [gorelikv@sennheiser.com](mailto:gorelikv@sennheiser.com)

17. 10. 2027

## Einleitung

Ultraschallstrahler finden Anwendung in Bewegungs- und Abstandssensoren, Anemometer, Flow-meter, in sogenannten parametrischen Lautsprechern (Audibeam) u.s.w.. In allen diesen Anwendungen erwartet man vom Strahler hohe Effektivität, d.h. hohen erreichbaren Schalldruck. Die Breitbandigkeit der Wandler bestimmt bei den Abstandssensoren und Flow-meter deren Genauigkeit.

Vor vielen Jahren wurden bei Schiliciser elektrostatische Ultraschallwandler für die Fernbedienung entwickelt und produziert. Alte know-how diente uns als Grundlage für die Entwicklung großflächiger und hocheffektiver Ultraschallstrahler vor allem für Audibeam-Anwendung. In dem vorliegenden Vortrag werden die Untersuchungsergebnisse diskutiert.

## Grundlagen

Ein in einer unendlichen, starren Wand schwingender Kolbenstrahler mit dem Radius  $a$  und Schnelle  $v$  erzeugt in einem bestimmten Abstand  $r$  auf seiner Achse den Schalldruck, der durch die folgende Gleichung [1] gegeben ist:

$$|p| = 2\rho cv \left| \sin \left[ \frac{k}{2} \left( \sqrt{r^2 + a^2} - r \right) \right] \right| \quad (1)$$

Im Unterschied zu [1] wir betrachten hier den Betrag des Schalldruckes. Der nach (1) berechnete Schalldruckverlauf in Abhängigkeit von normiertem Abstand  $r/r_s$ , wobei  $r_s = a^2/\lambda$  entspricht dem Abstand, bei dem der letzte Maximum erreicht wird, ist in der Abb. 1 dargestellt

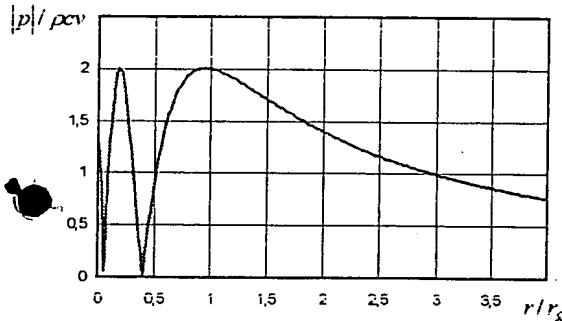


Abbildung 1: Schalldruck in der Achse eines Kolbenstrahlers

Für das Fernfeld ( $r \gg a^2/\lambda$ ) lässt sich die Gleichung (1) vereinfachen

$$p = \rho cv (ka^2 / 2r) = \frac{\rho fvA}{r} \quad (2)$$

wobei  $A = 2\pi a^2$  die Fläche des Kolbens ist.

Es ist jetzt leicht zu zeigen, dass das mechano-akustische System des breitbandigen Wandlers massengehemmt sein muss. Tatsächlich wächst dabei die mechanische Impedanz  $Z_M$  proportional zu der Frequenz:  $Z_M = \omega m$ , und für die Schnelle gilt:  $v = F/\omega \cdot m$  ( $F$  - frequenzunabhängige Coulombkraft). Das Einsetzen des letzten

Ausdrucks in (2) zeigt, dass der Schalldruck unabhängig von der Frequenz ist.

Ähnlich lässt sich zeigen, dass bei steifigkeitsgehemmten Systemen wir mit 12 dB/Okt und bei widerstandsgehemmten Systemen mit 6 dB/Okt steigenden Frequenzgang des Schalldruckes hätten. Da die Impedanz der realen Systeme immer alle drei Komponenten (Masse  $m$ , Steifigkeit  $S$  oder Nachgiebigkeit  $C$  und aktiven Widerstand  $R$ ) beinhaltet, hat der Frequenzgang des Wandlers immer drei, mehr oder weniger eindeutig erkennbaren, Bereichen (siehe Abb. 2). Bei tiefen Frequenzen  $Z_M = 1/\omega \cdot C \gg \omega \cdot m$ ; der Frequenzgang steigt mit 12 dB/Okt. Bei höheren Frequenzen, wo  $\omega \cdot m \gg 1/\omega \cdot C$  verläuft der Frequenzgang horizontal. Im kurzen Übergangsbereich, wo die reaktiven Impedanzkomponenten sich gegenseitig kompensieren, haben wir einen Frequenzganganstieg 6 dB/Okt.

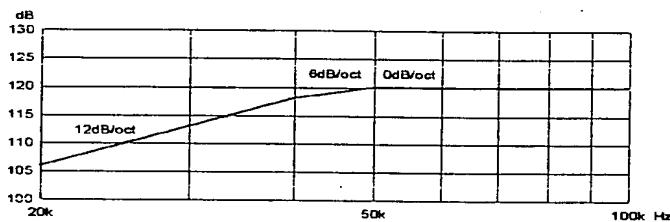


Abbildung 2: Typischer Frequenzgang des Ultraschallwandlers

Bei der Entwicklung eines breitbandigen Strahlers muß folglich der Resonanzfrequenz des Schwingungssystems an der unteren Grenze des gewünschten Frequenzbereiches liegen. Da die Resonanzfrequenz durch das Produkt  $m \cdot C$  bestimmt wird, haben wir dementsprechend gewisse Freiheit in der Auswahl von Masse und Nachgiebigkeit. Offensichtlich soll die Nachgiebigkeit des Systems möglichst groß sein, weil nur in diesem Fall die Bedingung  $\omega \cdot m \gg 1/\omega \cdot C$  bei minimaler Masse  $m$  erfüllt werden kann. Für eine massegehemmten System muss also nicht die Masseimpedanz groß sein, sondern Steifigkeitskomponente möglichst klein sein. Nur so konnte hohe Schnelle und letztendlich hoher Schalldruck erreicht werden.

An dieser Stelle müssen wir noch die Frage der mechanischen Stabilität der Membran betrachten. Die Coulombkräfte zwischen Gegenelektrode und Membran, die letztere in die Bewegung bringen, sind sehr schwach und vermindern sich mit dem Quadrat des Luftspaltes. Aus diesem Grund muß der Luftspalt möglichst klein sein. Hohe Schalldrücke erreicht man außerdem nur bei ausreichend großer schwingender Fläche der Membran. Diese zwei Forderungen (für einen breitbandigen Wandler auch die Forderung an möglichst kleine Steifigkeit des Systems) widersprechen einander, da eine großflächige Membran von der Gegenelektrode angzogen werden kann und dabei die Fähigkeit zum Schwingen (und folglich zum Strahlen) verliert. Bei den bekannten elektrostatischen Ultraschallwandlern löst man das Problem mit Hilfe von unterstützenden Elementen an der inneren Oberfläche der Gegenelektrode. Als solche können Stege oder Säulen dienen [2] [3] [4]. Verbreitet sind auch Ultraschallwandler, bei denen die Membran direkt auf der aufgerauteten Oberfläche der Gegenelektrode liegt [5]. In allen diesen Fällen ist die Membran in viele kleine strahlende Zonen unterteilt. Durch die erhöhte mechanische Stabilität arbeiten

solche Wandler mit wesentlich höheren Polarisation- und Signalspannungen. Entsprechend hoch ist dann auch der erreichbare Schalldruck.

### Konstruktive Ausführung des Wandlers

Bei der Konstruktion der Ultraschallwandler verfolgt man also zwei Ziele:

- minimale mögliche Verluste an schwingungsfähiger Membranfläche bedingt durch die Unterstützungsstruktur und
- möglichst ganzflächige effektive Anregung der Membran.

Einen Aufbau des Ultraschallwandlers, der alle oben formulierten Forderungen am weitesten erfüllt, ist von ehemaligem Sennheiser-Entwicklungsleiter in [1] beschrieben. Bei diesem Multi-Support-Wandler stützt sich die Membran auf kleine isolierende Scheibchen, die gleichmäßig auf der fein perforierten Gegenelektrode verteilt sind. Die Höhe der Scheibchen bestimmt dabei den Luftspalt zwischen Gegenelektrode und Membran. Als Gegenelektrode wurde galvanisch hergestellte Ni-Blech (ca.  $60\mu$  dick, Löcher ca.  $80\mu$ , pitch  $250\mu$ ) benutzt, der für Filtertechnik und Rasierapparate hergestellt wird. Da die Gegenelektrode perforiert ist, ist die Steifigkeit des Luftes zwischen Membran und Gegenelektrode vollkommen eliminiert. Die Gesamtsteifigkeit des Systems ist dabei nur durch die Membransteifigkeit bestimmt und kann so klein sein, dass das System schon ab  $20\text{ kHz}$  als ~~geheimtes~~ System gebaut werden kann.

Weitere Untersuchungen zeigten, dass durch die präzise Prägung der Gegenelektrode (sieh Abb.2) kann Multi-Support-Wandler nicht nur wesentlich vereinfachen (die Notwendigkeit der Distanzscheibchen entfällt), sondern auch seinen Wirkungsgrad erhöhen. Die metallisierte Kunststoffmembran liegt dabei direkt auf den Erhebungen der Gegenelektrode. Die von uns untersuchten PET-, PI- und Teflonfolien haben sehr hohe elektrische Durchschlagfestigkeit. Mit  $3\mu$  Mylar-Membran beträgt z. B. die maximale zulässige Spannung ca.  $300\text{ V}$ .



Abbildung 2: Prinzipielle Aufbau des Wandlers mit geprägter Gegenelektrode

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Erhebungen relativ große Flächen haben. Da die Membran im Idealfall nur auf den höchsten Punkten der Erhebungen liegt, sind die Verluste an schwingungsfähiger Membranfläche identisch mit denen beim Multi-Support-Wandler. Was aber die Anregungskräfte betrifft, hat die Variante mit der geprägten Gegenelektrode wesentliche Vorteile, da der Luftspalt zwischen Membran und Gegenelektrode im Bereich der Erhebungen kleiner als die Höhe der Erhebungen ist. Die Anregungskräfte in diesen Bereichen sind offensichtlich wesentlich höher, als in den Bereichen zwischen den Erhebungen und dadurch steigt der Wandlerwirkungsgrad.

Die neu entwickelte Prägungstechnologie erlaubt präzise und optimale Formgestaltung der Erhebungen nicht nur für kleine, sondern auch für großflächige (bis DIN A3) Wandler. Für Audiobeam-Anwendung wurden Wandler in der Größe  $20\text{x}30\text{ cm}$  hergestellt und untersucht. Die Konstruktion des Wandlers ist in der Abb. 3 dargestellt. Das geprägte Lochblech wird auf eine vorgefräste Aluminiumplatte geklebt. Eine Alu-Rahme mit der geklebten Membran ist mit Kunststoffschauben mit der Grundplatte verbunden. Im Randbereich muss zwischen der Membranrahme und dem Lochblech unbedingt eine Schutzfolie vorgesehen sein.

Elektrostat. Wandler Zeichnung

Abbildung 2: Großflächiger Wandler

Audiobeam mit Strahler

Abbildung 3: Audiobeam mit elektrostatischen Wandler

### Elektroakustische Parameter

Der Frequenzgang des Wandlers (gemessen bei Gleichspannung  $200\text{ V}$  und Wechselspannung  $100\text{ V}$ ) ist in der Abbildung 3 gezeigt. Es ist zu sehen, dass im breiten Frequenzbereich der Wandler sehr hohe Schalldrücke erzeugt.

Frequenzgang

Abbildung 3: Frequenzgang des großflächigen Wandlers

Selbstverständlich könnten auch nicht unbedingt ebenen Wandler hergestellt werden. Das könnte z. B. in den Fällen vorteilhaft sein, wo sehr hohe Richtwirkung des Ultraschallwandlers unerwünscht ist.

<sup>1</sup>| E. Skudržyk, *Die Grundlagen der Akustik*, Wien, Springer-Verlag 1954

<sup>2</sup>| L. Pizarro, D. Certon, M. Lethiecq, O. Boumatar, B. Hosten, *Experimental Investigation of Electrostatic Ultrasonic Transducers with Grooved Backplates*.“ 1997 IEEE ULTRASONIC SYMPOSIUM – 1003

<sup>3</sup>| Michael J. Anderson and James A. Hill „Broadband electrostatic transducers: Modeling and experiments. J. Acoust. Soc. Am. 97 (1), January 1995

<sup>4</sup>| H.-J. Griese, Wandler für Ultraschall-Fernsteuerungen, Funkschau 1973, Heft 9

<sup>5</sup>| W. Kuhl, G. R. Schodder, and F.-K. Schröder, Condenser transmitters and microphones with solid dielectric for airborn ultrasonic. *Acustica* 1954, No. 5

# Hocheffektive breitbandige Ultraschallwandler

Vladimir Gorelik

Sennheiser electronic GmbH & Co. KG; Email: [gorelikv@sennheiser.com](mailto:gorelikv@sennheiser.com)

## Einleitung

Ultraschallstrahler finden Anwendung in Bewegungs- und Abstandssensoren, Anemometer, Flow-meter, in sogenannten parametrischen Lautsprechern (AudioBeam) [¹] u.s.w.. In allen diesen Anwendungen erwartet man vom Strahler neben einen guten Richtwirkung hohe Effektivität, d.h. hohen erreichbaren Schalldruck. Bei den Abstandssensoren und dem Flow-meter bestimmt die Breitbandigkeit der Wandler deren Genauigkeit.

Vor vielen Jahren wurden bei Sennheiser elektrostatische Ultraschallwandler für Fernbedienungen entwickelt und produziert. Altes know-how diente uns als Grundlage für die Entwicklung großflächiger und hocheffektiver Ultraschallstrahler, vor allem für AudioBeam-Anwendungen. In dem vorliegenden Vortrag werden die Untersuchungsergebnisse diskutiert.

## Grundlagen

Ein in einer unendlichen, starren Wand schwingender Kolbenstrahler mit dem Radius  $a$  und der Schnelle  $v$  erzeugt in einem bestimmten Abstand  $r$  auf seiner Achse den Schalldruck, der durch die folgende Gleichung [²] gegeben ist:

$$|p| = 2\rho cv \sin \left[ \frac{k}{2} \left( \sqrt{r^2 + a^2} - r \right) \right] \quad (1)$$

Sinngemäß betrachten wir hier den Betrag des Schalldruckes. Der nach (1) berechnete Schalldruckverlauf in Abhängigkeit vom normierten Abstand  $r/r_g$ , wobei  $r_g = a^2/\lambda$  dem Abstand entspricht, bei dem das letzte Maximum erreicht wird, ist in Abb. 1 dargestellt.

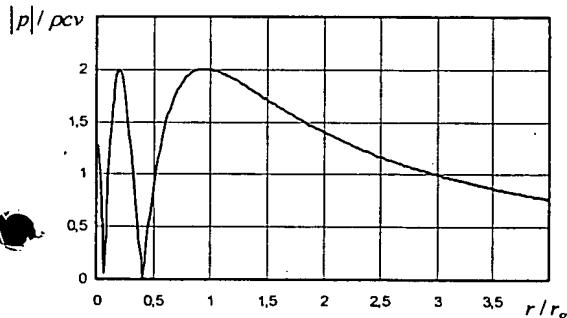


Abbildung 1: Schalldruck in der Achse eines Kolbenstrahlers

Für das Fernfeld ( $r \gg a^2/\lambda$ ) lässt sich Gleichung (1) vereinfachen

$$p = \rho cv (ka^2 / 2r) = \frac{\rho f v A}{r} \quad (2)$$

wobei  $A = 2\pi a^2$  die Fläche des Kolbens ist.

Es ist jetzt leicht zu zeigen, dass das mechano-akustische System des breitbandigen Wandlers massegehemmt sein muss: tatsächlich wächst dabei die mechanische Impedanz  $Z_M$  proportional zu der Frequenz:  $Z_M = \omega m$ , und für die Schnelle gilt:  $v = F/\omega \cdot m$ , wobei  $F$  die frequenzunabhängige Coulombkraft ist. Das Einsetzen des letzten Ausdrucks in (2) zeigt, dass der Schalldruck nun unabhängig von der Frequenz ist.

Ähnlich lässt sich zeigen, dass wir bei steifigkeitsgehemmten Systemen einen mit 12 dB/Okt und bei widerstandsgehemmten Systemen einen mit 6 dB/Okt steigenden Frequenzgang des Schalldruckes hätten. Da die Impedanz der realen Systeme immer alle drei Komponenten (Masse  $m$ , Steifigkeit  $S$  oder Nachgiebigkeit  $C$  und aktiven Widerstand  $R$ ) beinhaltet, hat der Frequenzgang des Wandlers immer drei - mehr oder weniger eindeutig erkennbare - Bereiche (vgl. Abb. 2). Bei tiefen Frequenzen, für die gilt  $Z_M = 1/\omega \cdot C \gg \omega \cdot m$ , steigt der Frequenzgang mit 12 dB/Okt an. Bei höheren Frequenzen, wo gilt  $\omega \cdot m \gg 1/\omega \cdot C$ , verläuft der Frequenzgang horizontal. Im kurzen Übergangsbereich, wo die reaktiven Impedanzkomponenten sich gegenseitig kompensieren, beobachten wir einen Frequenzganganstieg von 6 dB/Okt.

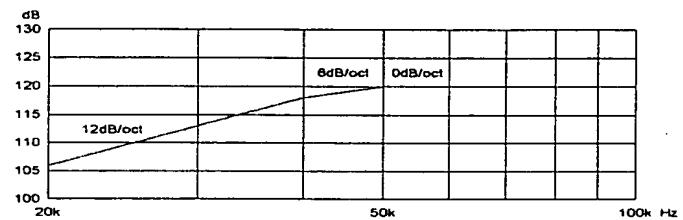


Abbildung 2: Typischer Frequenzgang des Ultraschallwandlers

Bei der Entwicklung eines breitbandigen Strahlers muß folglich die Resonanzfrequenz des Schwingungssystems an der unteren Grenze des gewünschten Frequenzbereiches liegen. Da die Resonanzfrequenz durch das Produkt  $m \cdot C$  bestimmt wird, haben wir dementsprechend eine gewisse Freiheit in der Auswahl von Masse und Nachgiebigkeit. Offensichtlich soll die Nachgiebigkeit des Systems möglichst groß sein, weil nur in diesem Fall die Bedingung  $\omega \cdot m \gg 1/\omega \cdot C$  bei minimaler Masse  $m$  erfüllt werden kann. Für ein massegehemmtes System muss also nicht die Masseimpedanz groß sein, sondern die Steifigkeitskomponente möglichst klein sein. Nur so können wir hohe Schnelle und letztendlich hohen Schalldruck erreichen.

An dieser Stelle müssen wir noch die Frage der mechanischen Stabilität der Membran betrachten. Die Coulombkräfte zwischen GegenElektrode und Membran, die letztere in Bewegung bringen, sind sehr schwach und vermindern sich mit dem Quadrat des Luftspaltes. Aus diesem Grund muss der Luftspalt möglichst klein sein. Hohe Schalldrücke erreicht man außerdem nur bei ausreichend großer schwingender Fläche der Membran. Diese zwei Forderungen (für einen breitbandigen Wandler auch die Forderung an möglichst kleine Steifigkeit des Systems) widersprechen einander, da eine großflächige Membran von der GegenElektrode angezogen werden kann und dabei die Fähigkeit zum Schwingen (und folglich zum Strahlen) verliert. Bei den bekannten elektrostatischen Ultraschallwandlern löst man das Problem mit Hilfe von unterstützenden Elementen an der inneren Oberfläche der GegenElektrode. Als solche können Stege oder Säulen dienen [³] [⁴] [⁵]. Verbreitet sind auch Ultraschallwandler, bei denen die Membran direkt auf der aufgerauhten Oberfläche der GegenElektrode liegt [⁶] [⁷]. In allen diesen Fällen ist die Membran in viele kleine strahlende Zonen unterteilt. Durch die erhöhte mechanische Stabilität können solche Wandler mit wesentlich höheren Polarisations- und Signalspannungen arbeiten. Entsprechend hoch ist dann auch der erreichbare Schalldruck.

solche Wandler mit wesentlich höheren Polarisation- und Signalspannungen. Entsprechend hoch ist dann auch der erreichbare Schalldruck.

### Konstruktive Ausführung des Wandlers

Bei der Konstruktion der Ultraschallwandler verfolgt man also zwei Ziele:

- minimale mögliche Verluste an schwingungsfähiger Membranfläche bedingt durch die Unterstützungsstruktur und
- möglichst ganzflächige effektive Anregung der Membran.

- Einem Aufbau des Ultraschallwandlers, der alle oben formulierten Forderungen am weitesten erfüllt, ist von ehemaligem Sennheiser-Entwicklungsleiter in [1] beschrieben. Bei diesem Multi-Support-Wandler stützt sich die Membran auf kleine isolierende Scheibchen, die gleichmäßig auf der fein perforierten Gegenelektrode verteilt sind. Die Höhe der Scheibchen bestimmt dabei den Luftspalt zwischen Gegenelektrode und Membran. Als Gegenelektrode wurde galvanisch hergestellte Ni-Blech (ca.  $60\mu$  dick, Löcher ca.  $80\mu$ , pitch  $250\mu$ ) benutzt, der für Filtertechnik und Rasierapparate hergestellt wird. Da die Gegenelektrode perforiert ist, ist die Steifigkeit des Lufträumes zwischen Membran und Gegenelektrode vollkommen eliminiert. Die Gesamtsteifigkeit des Systems ist dabei nur durch die Membransteifigkeit bestimmt und kann so klein sein, dass das System schon ab 20 kHz als angenommene System gebaut werden kann.

Weitere Untersuchungen zeigten, dass durch die präzise Prägung der Gegenelektrode (siehe Abb.2) kann man Multi-Support-Wandler nicht nur wesentlich vereinfachen (die Notwendigkeit der Distanzscheibchen entfällt), sondern auch seinen Wirkungsgrad erhöhen. Die metallisierte Kunststoffmembran liegt dabei direkt auf den Erhebungen der Gegenelektrode. Die von uns untersuchten PET-, PI- und Teflonfolien haben sehr hohe elektrische Durchschlagfestigkeit. Mit  $3\mu$  Mylar-Membran beträgt z. B. die maximale zulässige Spannung ca. 300 V.



Abbildung 2: Prinzipielle Aufbau des Wandlers mit geprägter Gegenelektrode

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Erhebungen relativ große Flächen haben. Da die Membran im Idealfall nur auf den höchsten Punkten der Erhebungen liegt, sind die Verluste an schwingungsfähiger Membranfläche identisch mit denen beim Multi-Support-Wandler. Was aber die Anregungskräfte betrifft, hat die Variante mit der geprägten Gegenelektrode wesentliche Vorteile, da der Luftspalt zwischen Membran und Gegenelektrode im Bereich der Erhebungen kleiner als die Höhe der Erhebungen ist. Die Anregungskräfte in diesen Bereichen sind offensichtlich wesentlich höher, als in den Bereichen zwischen den Erhebungen und dadurch steigt der Wandlerwirkungsgrad.

Die neu entwickelte Prägungstechnologie erlaubt präzise und optimale Formgestaltung der Erhebungen nicht nur für kleine, sondern auch für großflächige (bis DIN A3) Wandler. Für Audiobeam-Anwendung wurden Wandler in der Größe 20x30 cm hergestellt und untersucht. Die Konstruktion des Wandlers ist in der Abb. 3 dargestellt. Das geprägte Lochblech wird auf eine vorgefräste Aluminiumplatte geklebt. Eine Alu-Rahmen mit der geklebten Membran ist mit Kunststoffschauben mit der Grundplatte verbunden. Im Randbereich muss zwischen der Membranrahmen und dem Lochblech unbedingt eine Schutzfolie vorgesehen sein.

Abbildung 2: Großflächiger Wandler

Audiobeam mit Strahler

Abbildung 3: Audiobeam mit elektrostatischen Wandler

### Elektroakustische Parameter

Der Frequenzgang des Wandlers (gemessen bei Gleichspannung 200 V und Wechselspannung 100 V) ist in der Abbildung 3 gezeigt. Es ist zu sehen, dass im breiten Frequenzbereich der Wandler sehr hohe Schalldrücke erzeugt.

Frequenzgang

Abbildung 3: Frequenzgang des großflächigen Wandlers

Selbstverständlich könnten auch nicht unbedingt ebenen Wandler hergestellt werden. Das könnte z. B. in den Fällen vorteilhaft sein, wo sehr hohe Richtwirkung des Ultraschallwandlers unerwünscht ist.

<sup>1</sup>| E. Skudrzyk, *Die Grundlagen der Akustik*, Wien, Springer-Verlag 1954

<sup>2</sup>| L. Pizarro, D. Certon, M. Lethiecq, O. Boumatar, B. Hosten, *Experimental Investigation of Electrostatic Ultrasonic Transducers with Grooved Backplates*, 1997 IEEE ULTRASONIC SYMPOSIUM – 1003

<sup>3</sup>| Michael J. Anderson and James A. Hill „Broadband electrostatic transducers: Modeling and experiments. J. Acoust. Soc. Am. 97 (1), January 1995

<sup>4</sup>| H.-J. Giese, Wandler für Ultraschall-Fernsteuerungen, Funkschau 1973, Heft 9

<sup>5</sup>| W. Kuhl, G. R. Schodder, and F.-K. Schröder, *Condenser transmitters and microphones with solid dielectric for airborn ultrasonic*, Acustica 1954, No. 5

Elektrostat. Wandler Zeichnung

## Konstruktive Ausführung der Wandler und elektroakustische Parameter

Bei der Konstruktion der Ultraschallwandler verfolgt man also zwei Ziele:

- minimal mögliche Verluste an der schwingungsfähigen Membranfläche, bedingt durch die Unterstützungsstruktur und
- möglichst ganzflächige effektive Anregung der Membran.

Einen Aufbau des Ultraschallwandlers, der alle oben formulierten Forderungen am ehesten erfüllt, wurde in [5] beschrieben. Bei diesem Multi-Support-Wandler stützt sich die Membran auf kleine isolierende Scheibchen, die gleichmäßig auf der fein perforierten Gegenelektrode verteilt sind. Die Höhe der Scheibchen bestimmt dabei den Luftspalt zwischen Gegenelektrode und Membran. Da die Gegenelektrode perforiert ist, spielt die Steifigkeit der Luft zwischen Membran und Gegenelektrode keine Rolle mehr. Die Gesamtsteifigkeit des Systems ist dabei nur durch die Membransteifigkeit bestimmt und kann so klein sein, dass das System schon ab 40 kHz als massegehemmtes System gebaut werden kann.

Weitere Untersuchungen zeigten, dass durch die präzise Prägung der Gegenelektrode (siehe Abb.3) der Multi-Support-Wandler nicht nur wesentlich vereinfacht (die Notwendigkeit der Distanzscheiben entfällt), sondern auch sein Wirkungsgrad erheblich erhöht werden kann. Die metallisierte Kunststoffmembran liegt dabei direkt auf den Erhebungen der Gegenelektrode auf.

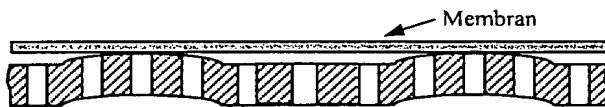


Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau des Wandlers mit geprägter Gegenelektrode

Die konstruktive Ausführung eines kleinen Wandlers mit dem Durchmesser 14,5 mm und Höhe 4,7 mm ist auf Abb. 4 zu sehen. Abb. 5 zeigt seine Frequenzgänge (20 kHz–200 kHz), aufgenommen mit B&K Messmikrofon 4138 ohne Schutzzitter. Gemessen wurde in 10cm Abstand bei 200V<sup>+</sup> Polarisationsspannung und 120V<sub>p</sub> Signalspannung. Die effektive strahlende Fläche des Wandlers beträgt 0,93 cm<sup>2</sup>, die Wandlerkapazität liegt bei ca. 60 pF.

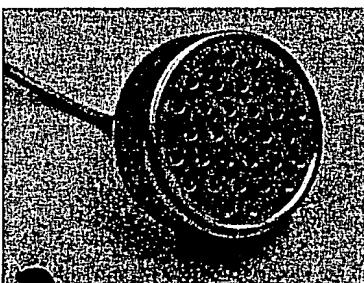


Abbildung 4: Miniaturwandler

Die obere Kurve repräsentiert einen Wandler ohne Lochgitter. Der in der Abb. 2 gezeigte typische Frequenzgangverlauf ist bei dieser Kurve gut erkennbar. Der erreichbare Schallpegel liegt über 120 dB SPL. Die untere Kurve wurde mit Lochgitter, wie in Abbildung 4 gezeigt, gemessen.

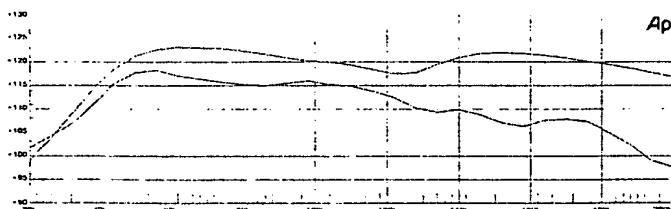


Abbildung 5: Amplitudenspektrum des Miniaturwandlers

Die obere Kurve repräsentiert einen Wandler ohne Lochgitter. Der in der Abb. 2 gezeigte typische Frequenzgangverlauf ist bei dieser Kurve gut erkennbar. Der erreichbare Schallpegel liegt über 120 dB SPL. Die untere Kurve wurde mit Lochgitter, wie in Abbildung 4 gezeigt, gemessen.

Da für viele Anwendungen ein breitbandiger Empfänger notwendig ist, wurde auch ein entsprechendes Elektretmikrofon entwickelt. Die Empfindlichkeit des Mikrofons beträgt ca. 1mV/Pa, seinen Frequenzgang zeigt Abb. 6. Für dieses Mikrofon wurde das gleiche Gehäuse benutzt, wie in Abb. 4. gezeigt ist.

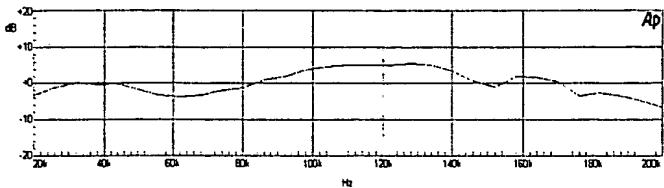


Abbildung 6: Amplitudenspektrum des Mikrofons

Die neu entwickelte Prägungstechnologie erlaubt präzise und optimale Formgestaltung der Gegenelektrode nicht nur für kleine, sondern auch für großflächige (bis DIN A3) Wandler. Für Audio-Beam-Anwendungen [1] wurden Wandler in der Größe 182x289 mm hergestellt. Die oben angegebenen Daten und Formel (2) erlauben praktisch für beliebige Wandlergrößen, den Schalldruck im Fernfeld zu berechnen.

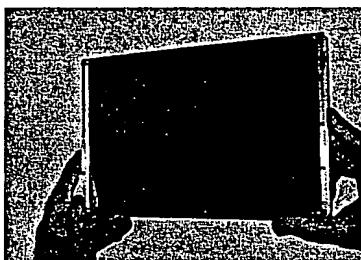


Abbildung 7: Großflächiger elektrostatischer Wandler

Selbstverständlich lassen sich z. B. auch zylindrisch gewölbte Wandler in dieser Technik herstellen. Das könnte in Fällen vorteilhaft sein, in denen die sehr hohe Richtwirkung des Ultraschallwandlers unerwünscht ist.

Auf die Darstellung der Richtdiagramme wurde an dieser Stelle bewußt verzichtet. Aus der Wandlergeometrie und den Wellenlängenbeziehungen lassen sie sich leicht berechnen.

Abschließend möchten wir hervorheben, dass erstmals ein optimiertes und aufeinander abgestimmtes breitbandiges Wandlerpaar (Sender und Empfänger) angeboten werden kann, das ideale Voraussetzungen für zahlreiche neue Anwendungen eröffnet.

<sup>1</sup> Neue Möglichkeit der Schallwiedergabe. rfe 1-2/00

<sup>2</sup> E. Skudrýk, Die Grundlagen der Akustik. Wien, Springer-Verlag 1954

<sup>3</sup> L. Pizarro, D. Certon, M. Lethiecq, O. Boumatar, B. Hosten, Experimental Investigation of Electrostatic Ultrasonic Transducers with Grooved Back-plates. 1997 IEEE ULTRASONIC SYMPOSIUM – 1003

<sup>4</sup> Michael J. Anderson and James A. Hill, Broadband electrostatic transducers: Modeling and experiments. J. Acoust. Soc. Am. 97 (1), January 1995

<sup>5</sup> H.-J. Griese, Wandler für Ultraschall-Fernsteuerungen. Funkschau 1973, Heft 9

<sup>6</sup> H. Sell, Eine neue kapazitive Methode zur Umwandlung mechanischer Schwingungen in elektrische und umgekehrt. Zeitschr. f. techn. Physik, Nr.1(1937), 3-10

<sup>7</sup> W. Kuhl, G. R. Schodder, and F.-K. Schröder, Condenser transmitters and microphones with solid dielectric for airborne ultrasonic. Acustica 1954, No. 5

# Eisenführ, Speiser & Partner

**Bremen**  
Patentanwälte  
European Patent Attorneys  
Dipl.-Ing. Günther Eisenführ  
Dipl.-Ing. Dieter K. Speiser  
Dr.-Ing. Werner W. Rabus  
Dipl.-Ing. Jürgen Brügge  
Dipl.-Ing. Jürgen Klinghardt  
Dipl.-Ing. Klaus G. Göken  
Jochen Ehlers  
Dipl.-Ing. Mark Andres  
Dipl.-Chem. Dr. Uwe Stilkensböhmer  
Dipl.-Ing. Stephan Keck  
Dipl.-Ing. Johannes M. B. Wasiljeff  
  
**Rechtsanwälte**  
Ulrich H. Sander  
Christian Spintig  
Sabine Richter  
Harald A. Förster

**Hamburg**  
Patentanwalt  
European Patent Attorney  
Dipl.-Phys. Frank Meier  
  
**München**  
Patentanwälte  
European Patent Attorneys  
Dipl.-Phys. Heinz Nöth  
Dipl.-Wirt.-Ing. Rainer Fritsche  
Lbm.-Chem. Gabriele Leißler-Gerstl  
Dipl.-Ing. Olaf Ungerer  
Patentanwalt  
Dipl.-Chem. Dr. Peter Schuler  
  
**Berlin**  
Patentanwälte  
European Patent Attorneys  
Dipl.-Ing. Henning Christiansen  
Dipl.-Ing. Joachim von Oppen  
Dipl.-Ing. Jutta Kaden  
Dipl.-Phys. Dr. Ludger Eckey  
  
**Alicante**  
European Trademark Attorney  
Dipl.-Ing. Jürgen Klinghardt

Bremen, 13. März 2003

Unser Zeichen: SA 5333-01DE KGG/ram  
Durchwahl: 0421/36 35 16

Anmelder/Inhaber: SENNHEISER ELECTRONIC ...  
Amtsaktenzeichen: Neuanmeldung „Ultraschallwandler mit hohem Wirkungsgrad“

## Ansprüche

1. Ultraschallwandler mit hohem Wirkungsgrad.
2. Ultraschallwandler nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch eines oder mehrere Merkmale, die in der Beschreibung und/oder in der Zeichnung offenbart sind.
3. Lautsprecher mit einer Vielzahl von Ultraschallwandlern, wie in der vorliegenden Anmeldung offenbart.
4. Ultraschallwandler, die aus einer Membran und einer rechten Gegenelektrode bestehen, wobei die Gegenelektrode in ihrer Oberfläche ein Profil aufweist, welches in etwa einem Sinusverlauf entspricht (Abbildung 2).
5. Ultraschallwandler nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand zwischen der Membran und der Oberfläche der Gegenelektrode sich im Querschnitt im Wesentlichen sinusförmig verhält.